

## Microstructures d'un grès affecté par une faille normale : anisotropie de connectivité et de perméabilité

FABRICE SURMA<sup>1</sup>, YVES GERAUD<sup>1</sup>, LAURENT POURCELOT<sup>2</sup>, FRANÇOIS GAUTHIER-LAFAYE<sup>1</sup>,  
JEAN BAPTISTE CLAVALD<sup>3</sup>, MARIA ZAMORA<sup>3</sup>, MARC LESPINASSE<sup>4</sup> et MICHEL CATHELINÉAU<sup>4</sup>

*Mot clés.* – Porosité, Perméabilité, Géochimie, Grès, Buntsandstein, Nourrissage de quartz, Faille normale, Inclusions fluides

*Résumé.* – Dans un système de failles normales de la bordure du fossé rhénan, les interactions eaux-roches de part et d'autre de ces failles peuvent contrôler les conditions des circulations fluides. L'objectif de ce travail est de caractériser les structures du réseau poreux dans la zone endommagée autour d'une de ces failles. Il est intéressant d'étudier la relation entre porosité et perméabilité dans cette zone. Des études pétrographiques et pétrophysiques, des mesures microthermométriques sur des inclusions fluides et la composition isotopique de l'oxygène ont permis de caractériser les structures de porosité des roches et notamment des ciments primaires et secondaires.

Le couplage de ces approches montre qu'une faille normale peut à la fois jouer le rôle de drain et de barrière à la circulation des fluides. En fonction de la direction de circulation, la faille joue le rôle de drain en laissant remonter les fluides parallèlement au plan de faille et le rôle de barrière, en focalisant les circulations dans le toit. L'anisotropie, notamment des propriétés de transfert héritées des conditions de dépôts fluviatiles, est profondément modifiée par les transferts subits dans le matériau. Ainsi les modifications des transferts dépendent des modifications du réseau poreux : l'hétérogénéité de la structure du réseau et l'anisotropie d'orientation ou de connectivité. Ce modèle de circulation est contrôlé par une interaction entre les modifications des structures du réseau poreux et les circulations fluides, entraînant des modifications de l'anisotropie de certaines propriétés du matériau autour de la faille.

### Porosity microstructures of a sandstone affected by a normal fault

*Key words.* – Porosity, Permeability, Geochemistry, Sandstone, Buntsandstein, Quartz overgrowth, Normal fault and fluid inclusions

*Abstract.* – **Introduction** – Normal faults are part of the elements that control fluid flows in sedimentary basins. They can play the role of a barrier or a drain [Hippler, 1993]. These pathways are anisotropic. The aim of this study is to determine the fluid pathways and to characterise the pore network and its role in the transfer properties.

Petrophysics, petrographics, geochemical and fluid inclusion studies allow us to characterise a Buntsandstein sandstone affected by a normal fault. This sandstone has a fluviatile origin, field evidenced by fluviatile channels, but also by some clay layers. The fault is located in the north east of France, in the Rhine Graben. The vertical displacement is about 3 meters, and the dip is 70° east. The fractured zone is composed of three compartments (the hanging wall and the footwall separated by a gouge) divided by three main faults (fig. 1). Oriented samples were taken from the three blocks and were studied following the procedure figure 2.

**Results** – The petrographical and mineralogical composition of the three compartments were different. The gouge and the footwall were characterised by quartz overgrowths, authigenic kaolinite (30 to 40 % of the clay fraction) and diagenetic illite (40 to 60 % of the clay fraction). The hanging wall was characterised by 70 to 80 % diagenetic illite of the clay fraction (fig. 3).

The isotopic composition of the footwall quartz overgrowth (fig. 4) was  $\delta^{18}\text{O}$  enriched ranging from 13,4 to 13,6 ‰ SMOW, compared to detritic quartz ranging from 10,7 to 11,8 ‰ SMOW. Such quartz precipitations originated from fluid circulations, with temperature ranging between 195°C and 225°C according to fluid inclusion data in quartz overgrowth. This occurred mainly in the hanging wall but also in the fault gouge. The isotopic study of minerals and the quartz overgrowth fluid inclusion study showed that these fluids were similar to present day fluids characterized by Pauwels *et al.* [1993] in the deep Upper Rhine Graben (tab. I).

The fault gouge was first like a drain allowing the fluid to circulate from the deep graben and then it acted as a barrier preventing the fluid from spreading in the hanging wall. This was confirmed by the study of thin sections, that revealed a cataclastic zone in samples located between the hanging wall and the gouge (fig. 5).

The evolution of **porosity** was characterised along a profile crossing the fault. Porosity values evolved from 12 % in the hanging wall, to 6 % in the fault gouge, and 12 % in the footwall (fig. 6). Oriented mercury injection measurements were carried out on covered (fig. 7) and non covered (fig. 6) epoxy resin samples to compare permeability related to porous network. When the samples were covered with epoxy resin, mercury was injected only into the network which was connected to the injection surface (fig. 7). The process indicated a connectivity of the sample and it could be quanti-

<sup>1</sup>Université Louis Pasteur, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Centre de Géochimie de la Surface, 1 rue Blessig, F-67084 Strasbourg cedex, France.

<sup>2</sup>Institut de la Protection et de la Sûreté Nucléaire, Bat 153. CEN-CEA Cadarache 13108 St Paul-Les-Durance cedex, France.

<sup>3</sup>IPGP Département des Géomatériaux, T 15-14 E3, 4 place Jussieu 75252 Paris cedex, France.

<sup>4</sup>Université Henri Poincaré Nancy 1, Faculté des Sciences, « Géosciences », UMR 7566 G2R « Géologie et Gestion des Ressources Minérales et Energétiques », BP 239, Bd des Aiguillettes, 54506 Vandoeuvre-Les-Nancy cedex, France.

Manuscrit déposé le 12 décembre 2001 ; accepté après révision le 5 novembre 2002.

fied. High differences between the two porosity values suggest that the porous network was not connected with the surface of the sample. The covered or not covered samples exhibited no porosity variations with orientation.

The lowest mean **permeability** occurred in the fault gouge (0,1 mD). It increased in the hanging wall (100 mD) and in the footwall (200 mD). The maximum value of oriented permeability measurements occurred in the bedding plane (250 mD) (fig. 8). The direction of this maximum permeability varied in the two blocks with the direction of the fluvial channels. The minimum permeability in the hanging wall (12 mD) and in the footwall (34 mD) were perpendicular to the bedding. This sedimentary permeability anisotropy disappeared in the gouge (fig. 8).

**Discussion** – Fault zones are assumed to be fluid pathways and fluid barriers. This study has shown that the same fault can act as a barrier and a drain for fluid circulation. Permeability anisotropy is usually related to fracturation, but only in the case of short time fluids pathways. Indeed, when the fracture network is totally cemented, the matrix plays the role of pathway. The evolution of the porous network depends on the tectonics and on the fluid circulation. Permeability and permeability anisotropy decrease as the distance to the gouge decreases. We also noticed a decrease of pore threshold and connectivity of the porous network. In fact, permeability depends on tortuosity, connectivity, but also on porosity and pore threshold [Katz and Thompson, 1987].

In these sandstones, classical mercury injection did not indicate any significant variations. But oriented and resin covered mercury injection allowed us to distinguished three types of samples response (fig. 9) :

- similar porosity and pore threshold in covered and non resin covered samples indicate a good connectivity , but no preferential orientation of the porous network ;
- similar porosity but different pore threshold indicate a preferential orientation of the structures but also a good connectivity ;
- different porosity and pore threshold indicate either a bad connectivity or a preferential orientation of the microstructures.

In this study, we have clearly shown an evolution of the permeability due to tectonic events and fluid circulations. The decrease of permeability and permeability anisotropy near the fault is principally due to the tectonic event. This decrease was associated with a decrease of porosity and pore threshold due to compaction in the footwall because of the great number of stylolithes. In the hanging wall, the decrease of petrophysical properties was due to precipitation of cement around quartz grains. The permeability reduction near the fault accounted for the role of the microstructures in fluid pathways. They were horizontal in the undeformed rock and became vertical in the faulted rock.

## INTRODUCTION

Dans les bassins sédimentaires, les failles font partie des éléments qui contrôlent les circulations de fluides, elles peuvent jouer le rôle de drains ou de barrières [Hippler, 1993]. L'histoire tectonique régionale et les processus de déformation, associés au fonctionnement des failles, peuvent perturber ces circulations de fluides dans un bassin [Grauls et Baleix, 1994]. Les processus mis en jeu sont de différents types. Ils sont purement physiques, tel que la fissuration, le glissement des grains les uns par rapport aux autres, la déformation plastique et élastique, ou ils peuvent être chimiques : dissolution, néoformation de minéraux, cimentation par transfert de matière [Renard, 1994]. Ces processus peuvent être activés physiquement ou chimiquement, on parle alors de processus mécano-chimique, hydro-chimique, et enfin physico-chimique, comme la dissolution-cristallisation sous contrainte. Ces processus transforment les matériaux dans le plan de faille, mais aussi dans un certain volume de matériau autour de la faille : la zone endommagée [Caine *et al.*, 1996]. Les caractéristiques actuelles du drainage dans un bassin vont donc dépendre, en grande partie, des modifications des structures liées au fonctionnement des failles et à la présence des fluides.

Notre étude consistera à caractériser le réseau poreux et les propriétés de transfert des fluides dans la zone endommagée autour d'une faille. Les transformations de la porosité sont liées aux modifications pétrographiques : précipitation du quartz et recristallisation des argiles. Cela passe par une étude pétrographique (lames minces colorées, MEB), une étude des isotopes de l'oxygène ( $\delta^{18}\text{O}$ ) et une étude microthermométrique des inclusions fluides des nourrissages de quartz [Surma, 1999].

La caractérisation pétrophysique de ces structures a mis en évidence une anisotropie de perméabilité dans ces formations. Nous tenterons de comprendre pourquoi et comment évolue cette anisotropie avec la déformation de la faille. On essaiera de relier la perméabilité et la porosité, par des essais porosimétriques se rapprochant des conditions expérimentales des mesures de la perméabilité (dans une direction d'injection qui se fait dans une seule direction), afin de déterminer les caractéristiques géométriques du réseau qui pourraient expliquer ces anisotropies de perméabilité.

## SITE D'ÉTUDE

La zone de faille étudiée se situe à Buhl, dans le champ de fracture de Guebwiller (Haut-Rhin, 68), sur la bordure sud-ouest du Fossé rhénan et affecte la formation des grès vosgiens du Buntsandstein. Ce grès est d'origine fluviale. On y trouve des figures sédimentaires, notamment des stratifications entrecroisées et des chenaux. La faille normale étudiée a un rejet de trois mètres. Elle est orientée N175, avec un pendage de 70° vers l'est. Plusieurs générations de stries montrent que cette faille est probablement structurée par plusieurs épisodes de mouvements normaux. Le régime de contraintes qui a conduit à la formation de ce plan de faille est obtenu par une étude des stries, traités par la méthode inverse « ETCHECOPAR » (Etchecopar et Mattauer [1988], cité par Heitz [1996]), le tenseur obtenu est le suivant [Schoen, 1998] :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0,62389 \text{ direction : } 188,1 \pm 18,1 \quad \text{pendage : } 73 \pm 9,5 \\ \sigma_2 &= -0,24778 \text{ direction : } 8,4 \pm 11,1 \quad \text{pendage : } 17 \pm 9,5 \\ \sigma_3 &= -0,37611 \text{ direction : } 278,3 \pm 10,7 \quad \text{pendage : } 0,1 \pm 5,1 \end{aligned}$$

Ce tenseur correspond au régime extensif E-W datant de l'Oligocène obtenu par Villemin et Bergerat [1987]. La

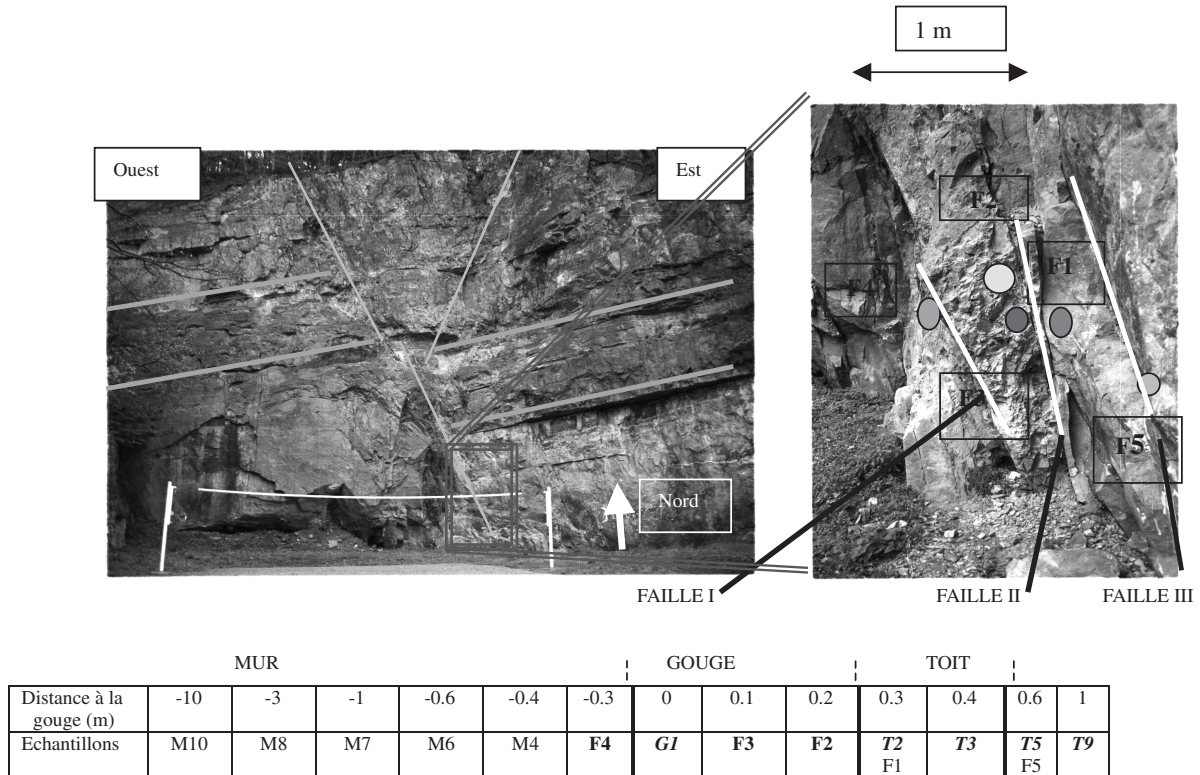


FIG. 1. – Situation et échantillonnage dans la carrière de Buhl.  
 FIG. 1. – Location of the samples in Buhl's quarry.

zone de fracture comprend trois failles, dont une faille principale, qui délimite le mur et la gouge, et deux failles secondaires qui séparent la gouge et le toit (fig. 1). Une série d'échantillons a été prélevée selon un profil perpendiculaire au plan de la faille.

**ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE ET MINÉRALOGIQUE**

Des lames orientées dans trois directions de l'espace, dont une parallèle au plan de la faille, ont été confectionnées afin de bien caractériser le matériau dans l'espace (fig. 2). Les axes perpendiculaires à ces lames correspondent aux axes des carottes pour les mesures de porosité et de perméabilité orientées.

Les minéraux principaux mis en évidence (quartz, feldspaths altérés et muscovite) sont communs aux trois compartiments. La fraction argileuse inférieure à 2 µm, analysée par diffraction des rayons X [Larqué et Weber, 1978] permet de caractériser les trois compartiments de la faille. Dans le mur, la phase argileuse est principalement constituée d'illites (70 à 80 %) en lattes et en plaques bien cristallisées localisées en bordure de grains (fig. 3). La kaolinite plus rare (1 à 8 % de la fraction argileuse) est d'origine détritique. Des figures de dissolutions sont visibles entre les grains. Le toit est caractérisé par du quartz authigène sous forme de nourrissage autour des grains détritiques (fig. 4) et par un enrichissement en kaolinite néoformée (30 à 40 % de la fraction argileuse, pour 40 à 50 % d'illite) (fig. 3). La gouge a des caractéristiques proches du toit, mais avec un pourcentage de kaolinite néoformée deux fois plus faible que dans le toit.

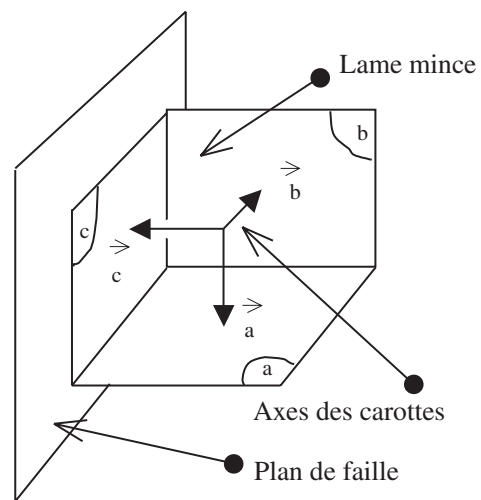
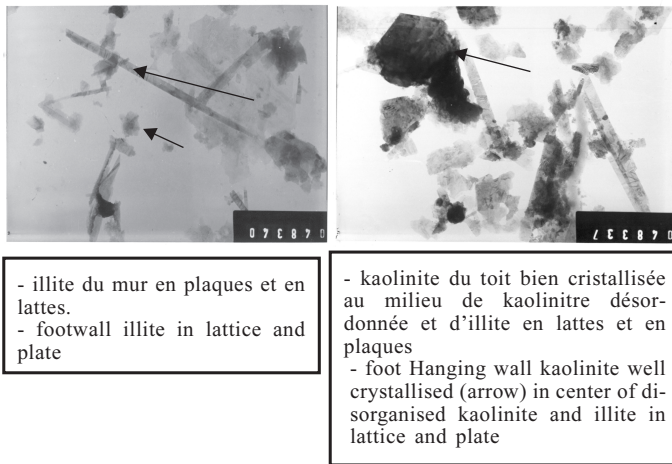


FIG. 2. – Orientation des lames minces, par rapport au plan de faille, et des axes des carottes pour la porosité mercure et la perméabilité.  
 FIG. 2. – Thin sections orientation, in regard to the fault plane and the core axis for mercury injection and permeability measurements.

L'observation d'échantillons macroscopiques et des lames orientées prélevées au contact entre la faille et le mur (échantillon 4), révèle la présence d'une cataclase tout le long du plan de la faille principale F1. Cette cataclase est aussi présente sur les plans des failles secondaires, mais cette fois-ci elle n'est pas continue (échantillon 3).

Dans le toit et la gouge, les nourrissages sont observés autour de tous les grains de quartz alors que dans le mur, ces nourrissages sont quasiment inexistantes (fig. 4).



- illite du mur en plaques et en lattes.  
- footwall illite in lattice and plate

- kaolinite du toit bien cristallisée au milieu de kaolinite désordonnée et d'illite en lattes et en plaques  
- foot Hanging wall kaolinite well crystallised (arrow) in center of disorganised kaolinite and illite in lattice and plate

FIG. 3. – Morphologie des argiles au MET (microscope électronique à transmission).

FIG. 3. – *Clays morphology by TEM (transmission electron microscope).*

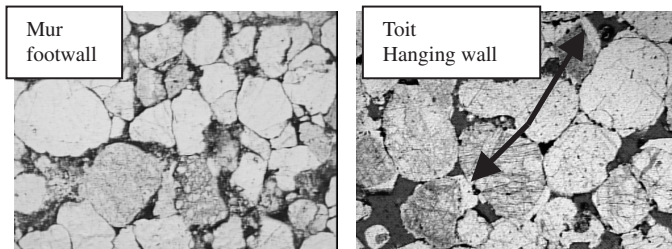


FIG. 4. – Lames minces vues au microscope optique, les flèches montrent les nourrissages de quartz.

FIG. 4. – *Thin sections by optical microscope, quartz overgrowths are shown by arrows.*

Des processus différents transforment le matériau de part et d'autre de la faille. Des précipitations dans le toit et la gouge (présence de nourrissage de quartz et de minéraux argileux néoformés) entraînent un colmatage du réseau poreux et la dissolution de minéraux dans le mur (traces de dissolution et minéraux imbriqués qui réduisent l'espace intergranulaire). C'est pourquoi, on cherche à identifier les facteurs pétrophysiques et chimiques associés à ces processus de dissolution et cristallisation.

## INCLUSIONS FLUIDES ET ISOTOPES DE L'OXYGÈNE DES NOURRISSAGES DE QUARTZ

Les fluides piégés dans de petites cavités des ciments siliceux gardent leurs signatures en pression – température ainsi qu'en composition associée à la cristallisation du minéral [Poty *et al.*, 1976]. Leur caractérisation se fait à partir de la détermination des températures d'homogénéisation de phase ainsi que des températures de fusion de la glace [Bodnard, 1993]. Avec une indication de pression [profondeur déduite à partir d'une étude de Dubois *et al.*, 1996], l'étude des inclusions donne une idée des conditions de piégeage du fluide [Poty *et al.*, 1976].

Les températures d'homogénéisation des inclusions fluides des nourrissages de quartz de l'échantillon T5 du toit, sont comprises entre 169,1°C et 188,1°C. Les températures de fusion de la glace sont comprises entre – 16,6°C et

– 2,2°C. Les données permettent de déterminer une température de piégeage comprise entre 195°C et 225°C, pour une pression comprise entre 54 et 66 bars [Surma, 1999].

La nature de ces fluides a été déterminée par l'étude des isotopes de l'oxygène des nourrissages de quartz. Les nourrissages sont séparés des grains détritiques par des cycles gel-dégel [Lee et Savin, 1985]. Les grains aux formes anguleuses caractéristiques de nourrissages sont séparés des grains détritiques par un tri au tamis et sous la loupe bino-culaire. Ces quartz de nourrissage ont un  $\delta^{18}\text{O}$  de 13,4 à 13,6 ‰ SMOW, enrichis en  $^{18}\text{O}$  par rapport aux grains détritiques (10,7-11,8 ‰ SMOW). Le rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  d'un quartz de placage d'une faille secondaire (F2) est de 17,5 ‰. Ces rapports ainsi que ceux déterminés pour la fraction argileuse de deux échantillons du toit et d'échantillons du mur, permettent de calculer les rapports isotopiques des fluides en équilibre avec les minéraux. Ils révèlent au moins trois fluides distincts (tab. I).

TABLE I. – Rapports isotopiques des minéraux, températures et rapports isotopiques des fluides à l'équilibre températures et fluides associés.

TABLE I. – *Mineral isotopic composition, temperature and fluid composition associated.*

Minéraux	Compartiments	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ (fluide) (‰ SMOW)	Température (°C)
Quartz de nourrissage	Toit	13.5	1.56 à 3.36	195 à 225
Quartz de placage	Sur plan de faille	17.5	-1.5	130
Kaolinite	toit	16.3	-1.5	130
Illite	mur	15.7	12	250

Le quartz de nourrissage a cristallisé à partir d'un fluide de composition isotopique comprise entre 1,56 et 3,36 ‰, à des températures comprises entre 195 et 225 °C. Le quartz de placage aurait cristallisé à une température autour de 130°C ainsi que la kaolinite du toit, à partir d'un fluide météorique de – 1,5 ‰. L'illite du mur serait diagénétique et aurait une température de cristallisation autour de 250 °C.

Une chronologie relative (fig. 5), déterminée à partir d'observation pétrographique et correspondant aux différentes phases de cristallisation de minéraux, est associée à une diminution de pression et de température [Surma, 1999].

## ETUDE PÉTROPHYSIQUE

La détermination de la porosité a été réalisée à l'aide de deux méthodes complémentaires : la mesure de porosité à l'eau par triple pesée et la mesure de porosité par injection de mercure. Les protocoles expérimentaux ont été largement décrits par Tournier [2001], Sizun [1995], Mertz [1991], Pellerin [1980] et Monicard [1975]. Les mesures de porosité par injection de mercure permettent de déterminer la distribution des diamètres d'accès à la porosité. La détermination d'un diamètre moyen par la méthode des tangentes [Mertz, 1991] nous donnent le rayon d'accès équivalent. C'est ce rayon que nous utilisons pour comparer les échantillons des différents essais. Nous avons effectué deux types d'essais d'injection au mercure sur des carottes orientées dans les trois directions de l'espace (fig. 2). Le premier est effectué sur des échantillons non recouverts, le second est effectué sur un lot d'échantillons recouverts d'une résine à séchage rapide. Cette résine limite l'intrusion aux faces afin

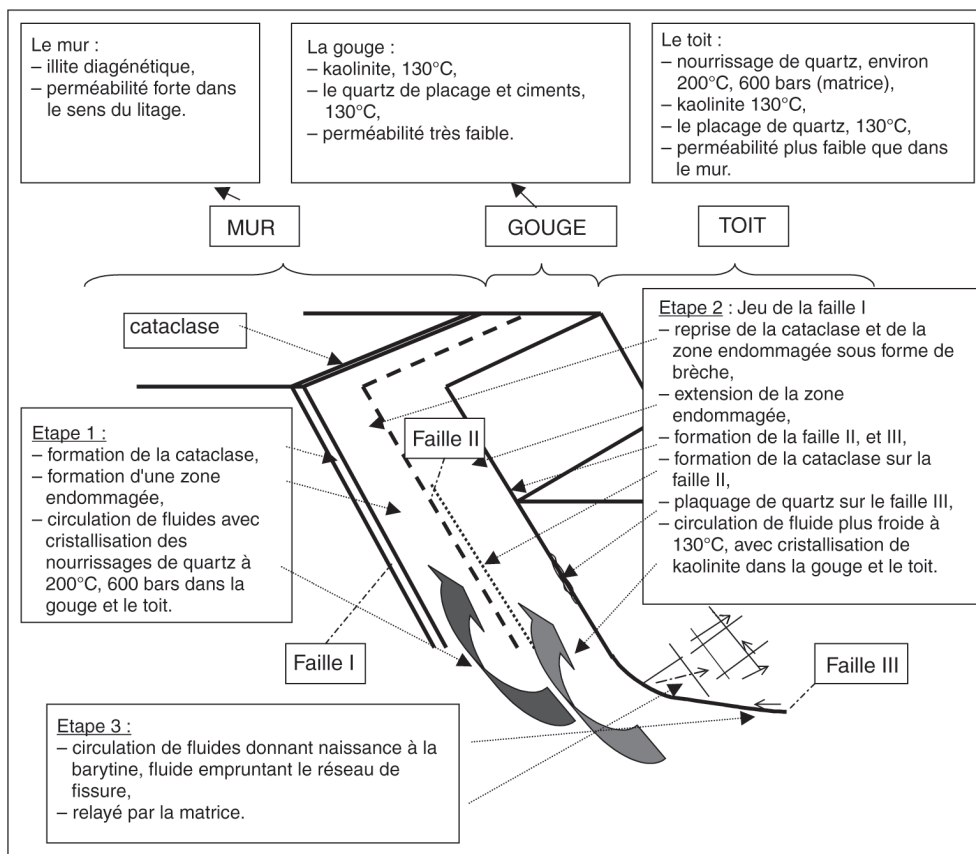


FIG. 5. – Modèle de circulation des fluides dans la faille normale de Buhl.  
 FIG. 5. – Conceptual fluid flow model in the Buhl normal fault.

de se placer dans des conditions similaires aux mesures de perméabilité et de déterminer les caractéristiques géométriques du réseau : porosité, seuils d'accès aux pores, orientation des structures dans l'espace et anisotropie de connectivité du réseau poreux [Géraud et Gaviglio, 2000]. Les mesures de porosité par injection de mercure ainsi que les mesures de perméabilité ont été réalisées sur des échantillons orientés (fig. 2).

La détermination des caractéristiques géométriques du réseau poreux qui contrôlent en partie les caractéristiques de perméabilité permettent de relier perméabilité et porosité. Des mesures sont réalisées pour des carottes orientées selon les directions a, b et c (fig. 2) des échantillons F5, F1, F4, M4 et M10, afin de caractériser l'anisotropie.

**LES RÉSULTATS**

Les valeurs de porosité à l'eau des échantillons sont de 12 % dans le mur et de 10 % dans le toit. Elles sont plus faibles dans la gouge, environ 6 % (fig. 6). Les valeurs de porosité à l'eau et les valeurs par injection de mercure sont identiques sur des échantillons dont on ne connaît pas l'orientation (fig. 6). La porosité, ainsi déterminée, peut être considérée comme représentative, les valeurs étant très proches pour deux volumes différents : 100 cc pour la porosité à l'eau et 3 cc pour la porosité par injection de mercure. On peut donc considérer que les diamètres d'accès sont représentatifs. Dans le mur, l'échantillon M10 est pris comme représentatif du matériau non déformé, nous observons

deux familles de pores : l'une où les pores supérieurs à 3 µm sont caractéristiques des vides inter granulaires, et l'autre où les pores inférieurs à 3 µm sont caractéristiques des vides intra granulaires. De plus, les diamètres moyens des seuils d'accès aux pores diminuent quand on se rapproche de la gouge et les familles disparaissent au profit d'une seule famille de diamètres d'accès (fig. 6) : inférieurs à 1 µm dans la gouge, supérieurs à 1 µm dans le mur et le toit.

Les résultats de porosimétrie par injection de mercure sont représentés dans le tableau II. Les porosités et les diamètres d'accès à la porosité varient selon l'orientation de l'échantillon, mais aussi quand l'échantillon est recouvert de résine ou non. En effet, l'échantillon F4 a des porosités

TABLE II. – Résultats de porosimétrie par injection au mercure.  
 TABLE II. – Mercury injection porosimetry results

Echantillon sample	Orientation	Volume en %	Diamètre des seuils d'accès en µm Pore threshold (µm)
	Avec (r) ou sans résine(nr) With (r) or without (nr) epoxy resin		
F1	F1a (nr)	9	1
	F1a (r)	8	1
	F1b (nr)	8	0.7
	F1b (r)	8	0.7
	F1c (nr)	-	-
	F1c (r)	-	-
F5	F5a (nr)	11.78	1
	F5a (r)	9.55	0.8
	F5b (nr)	12	2
	F5b (r)	8	0.9
	F5c (nr)	10	1
	F5c (r)	10	1
F4	F4a (nr)	7.06	0.9
	F4a (r)	7.29	0.8
	F4c (nr)	7.8	0.9
	F4c (r)	7	0.8
	F4b (nr)	9	1.8
	F4b (r)	7	0.6

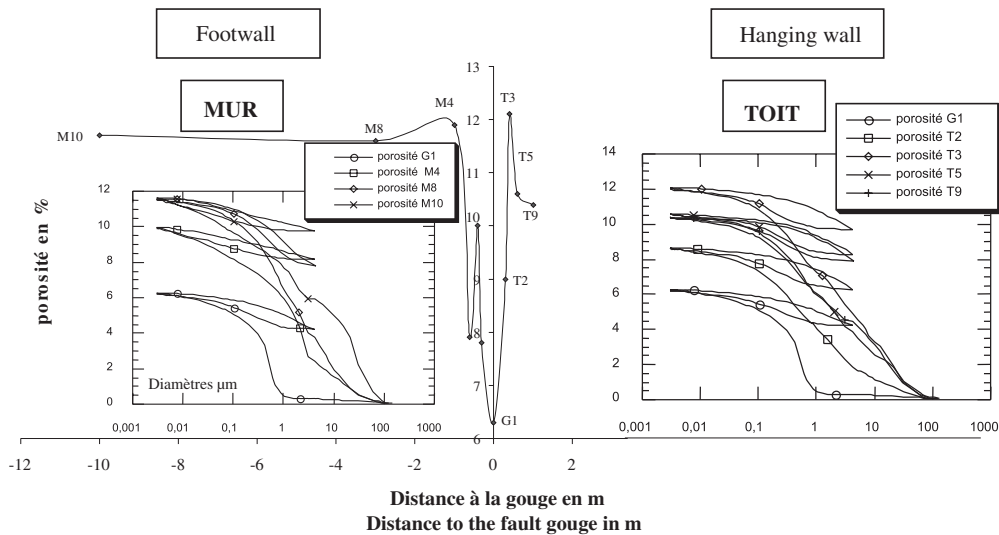


FIG. 6. – Courbes de porosité en fonction des diamètres d'accès par injection de mercure et profil de porosité à l'eau dans les trois compartiments de la faille pour les mêmes échantillons.

FIG. 6. – Porosity in relation to pore diameters for mercury injection curves and water porosity profile along the fault for the same samples.

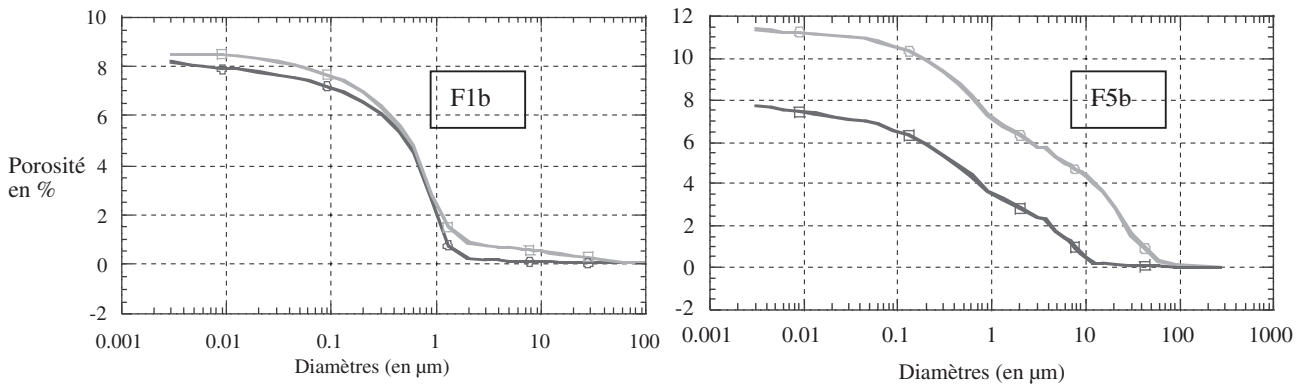


FIG. 7. – Courbes de porosité par injection mercure de deux échantillons F1b et F5b, en noir les échantillons recouverts de résine, en gris les échantillons non recouverts.

FIG. 7. – Mercury injection curves for two samples F1b and F5b, in black resin covered samples, in grey non-covered samples.

différentes selon l'orientation : F4a(nr) a 7 % de porosité alors que F4b(nr) a 9 % de porosité. Mais l'échantillon F4c présente des variations de porosité selon qu'il soit recouvert ou non de résine : F4c(nr) 9 % et F4C(r) 7 %. Les courbes d'intrusion des échantillons non recouverts sont soit équivalentes, soit elles présentent des valeurs de volume poreux supérieures de 11 à 33 % à celles des échantillons recouverts (fig. 7). Ainsi, pour l'échantillon F1b (fig. 7), les deux courbes d'injection de mercure, sont pratiquement identiques. Pour l'échantillon F5b, les deux courbes sont décalées. En effet, on fait entrer du mercure par des pores 5 fois plus petits lorsque l'échantillon est recouvert de résine et la porosité diminue de 2,5 % en volume. Les variations de porosité concernent surtout les gros diamètres d'accès.

On a déterminé une évolution de la valeur moyenne de perméabilité mais aussi l'évolution de son anisotropie (fig. 8). La perméabilité est faible dans la gouge (0,1 mD) et

elle est plus forte dans le mur et le toit, 100 mD et 200 mD respectivement [Schoen, 1998 ; Surma, 1999]. Contrairement aux valeurs de porosité, les valeurs de perméabilité ne sont pas tout à fait symétriques par rapport à la faille. Elle est deux fois plus grande dans le mur (250 mD) que dans le toit (98 mD), pouvant souligner un effet de connectivité qui se superpose aux effets des caractéristiques géométriques. Dans le mur (M10), loin de la faille, où l'on considère que le matériau est le moins déformé, la perméabilité maximale ( $K_{max}$ ) de 250 mD est mesurée dans la direction c, qui est le plan de stratification. Dans le toit, la perméabilité maximale de 98 mD est toujours comprise dans le plan de stratification, mais dans la direction perpendiculaire b. La perméabilité minimale ( $K_{min}$ ) est perpendiculaire aux deux autres directions et est mesurée dans la direction a. Le rapport  $K_{max}/K_{min}$  est significatif de l'anisotropie, diminue quand on se rapproche de la faille et varie de 7,35 à 1,75 dans le mur, et de 8 à 1,83 dans le toit.

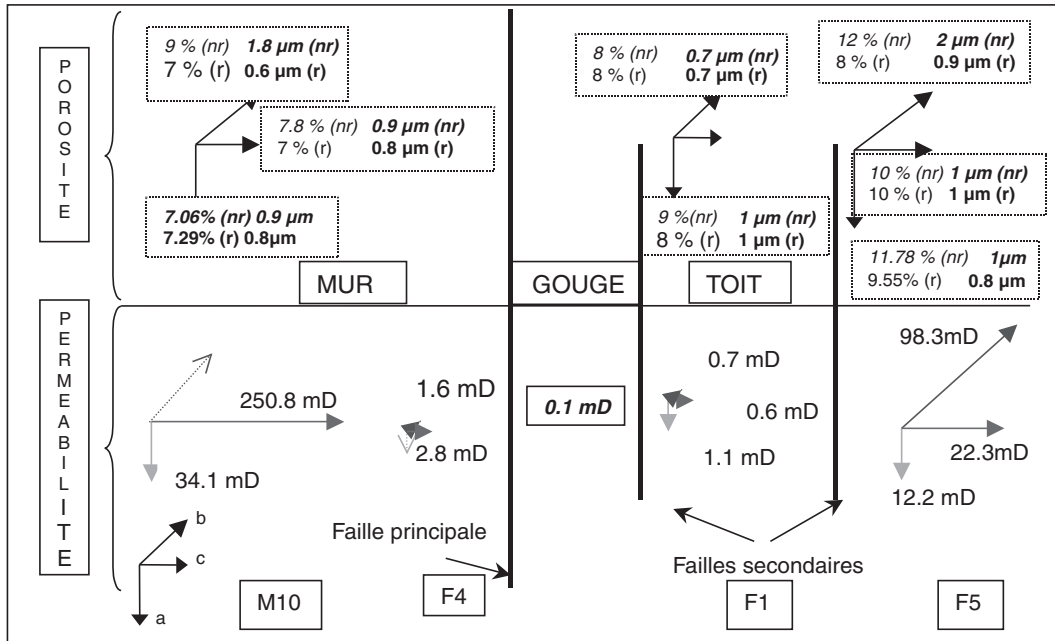


FIG. 8. – Porosités orientées sur des échantillons recouverts ( r ) ou non (nr) de résine à séchage rapide. Résultats des mesures de perméabilité dans les trois directions de l'espace (en pointillé les données manquantes).

FIG. 8. – Oriented porosity on covered ( r ) and non covered (nr) resin samples. Permeability measurements results in three directions (missing points in dotted line).

## DISCUSSION

Les zones de faille sont reconnues pour être des chemins de drainage préférentiel des fluides à l'échelle des bassins sédimentaires [Hippler, 1993 ; Caine *et al.*, 1996]. Ces fluides s'écoulent parallèlement et perpendiculairement au plan de faille faisant apparaître une anisotropie de perméabilité [Grauls et Baley, 1994]. Cette anisotropie est généralement liée à la fracturation et entraîne un écoulement rapide des fluides [Etheridge *et al.*, 1983]. Ces chemins d'écoulement ont une durée de vie courte du fait notamment d'une cimentation du réseau ouvert [Renard *et al.*, 2000] ; les produits déposés sont amenés des zones de dissolution-production vers les zones de précipitation par un réseau plus ou moins complexe qui correspond, pour partie, au réseau poreux matriciel. Ainsi, après le colmatage rapide du réseau macroscopique de fractures et de fissures, le seul réseau qui reste efficace peut être celui de la matrice. La géométrie de ce réseau matriciel, également déformé, dépend de la position du matériau par rapport à la faille [Caine *et al.*, 1996]. Ainsi, l'évolution du réseau poreux du matériau et de sa perméabilité est significative de l'endommagement du matériau et conditionne les circulations « actuelles » des fluides dans les bassins.

Les perméabilités moyennes de la zone de faille de Buhl diminuent de 200 mD à 0.1 mD dans la gouge de faille, zone la plus déformée. Loin de la faille, là où le matériau est le moins déformé, aussi bien dans le mur que dans le toit, l'orientation de  $K_{max}$  est dépendante des structures sédimentaires initiales. Liu *et al.* [1996] ont montré que l'axe du chenal correspond à la direction maximale de perméabilité, alors que la direction perpendiculaire à l'axe et au plan de stratification correspond à la direction minimale de perméabilité. Pour déterminer le lien entre cette propriété et les caractéristiques du réseau poreux, nous avons utilisé une technique d'injection de mercure qui s'effectue selon une

direction comparable à celle des mesures de perméabilité. Grâce à cette technique, il nous est possible d'accéder directement aux diamètres d'accès et au volume poreux qui contrôle directement les propriétés physiques. D'autre part Katz et Thompson [1987] proposent de calculer une valeur de perméabilité à partir de ces paramètres. L'écart entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées est significatif des effets de connectivité et de tortuosité. Ainsi la diminution des perméabilités mesurées peut être reliée à une diminution des diamètres d'accès et de volume poreux. Toutefois les auteurs ne font pas intervenir les variations de la tortuosité et de la connectivité. Ce sont les essais d'injection orienté qui permettent de tester une éventuelle anisotropie de connectivité du réseau. Plusieurs cas peuvent être distingués (fig. 9) :

- la variation du volume poreux entre les deux essais montre une variation de la connectivité du réseau. En effet le cas b) de la figure 9 montre que seul les réseaux 1 et 2 sont connectés mais pas le 3 (exemple échantillon F5b et F5a, fig. 6),

- les porosités identiques mais des diamètres de seuils d'accès différents entre les deux types d'essais, traduisent une orientation préférentielle des structures caractérisées par des seuils d'accès différents, mais une bonne connectivité du réseau poreux malgré l'orientation des structures (fig. 9-c, exemple de l'échantillon F4a, fig. 6).

- les porosités et les diamètres différents traduisent à la fois une orientation préférentielle du réseau, et/ou une mauvaise connectivité de celui-ci (fig. 9-b et c). On voit par exemple que pour l'échantillon F4b et F4c (fig. 6), les valeurs de seuils d'accès sont différentes, cela veut dire qu'une partie du réseau n'est accessible qu'à partir de certaines faces de l'échantillon, on a une mauvaise connectivité du réseau poreux, et/ou une moins bonne orientation des structures du réseau (fig. 9c, 2 ou 3).

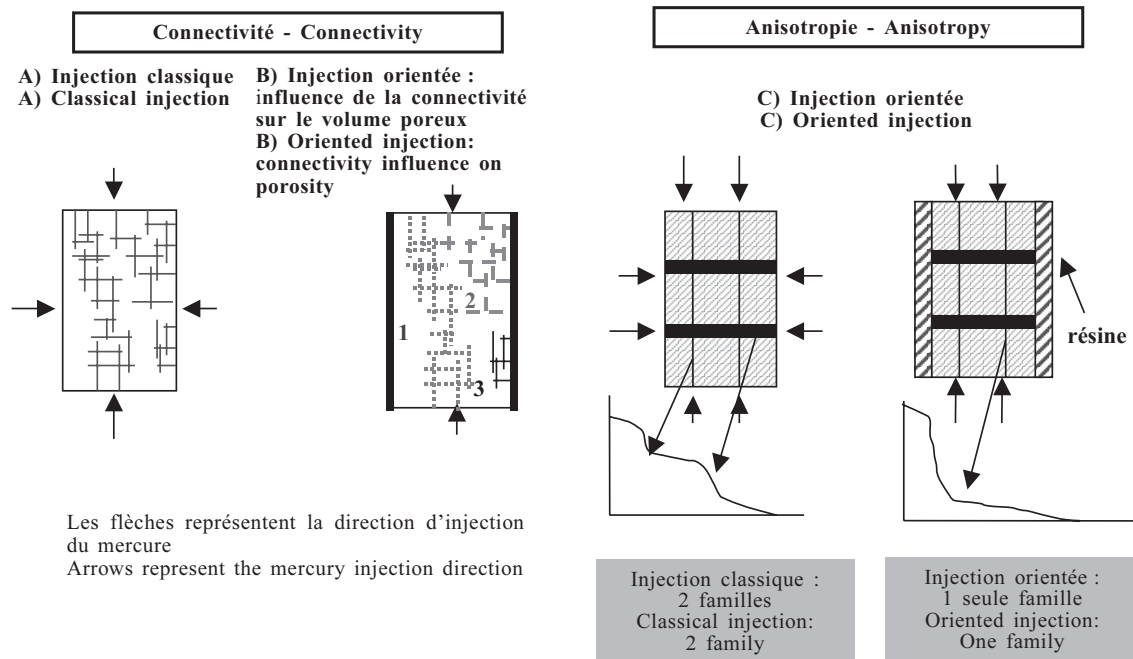


FIG. 9. – Modèle d'injection de mercure dans un échantillon recouvert de ré-

siné avec différentes structures et connectivités du réseau poreux.

A) Injection classique : Injection du mercure dans la structure du réseau poreux selon toutes les faces de l'échantillon, et sans tenir compte des seuils d'accès aux pores  
 B) Injection orientée : influence de la connectivité sur le volume poreux  
 Injection du mercure dans la structure du réseau poreux d'un échantillon recouvert de résine à séchage rapide, selon deux faces précises, et sans tenir compte des seuils d'accès aux pores : 1) le réseau est bien connecté entre les deux faces injectées ; 2) le réseau n'est connecté qu'à une seule face ; 3) le réseau n'est pas connecté à une des faces injectées.

C) Injection orientée : influence de l'anisotropie sur les diamètres d'accès.

FIG. 9. – Mercury injection model in resin covered samples in various structure and connectivity porous media.

A) Classical injection : mercury injection in a porous medium whatever the face of the sample and without taking into account the pore threshold.

B) Oriented injection : connectivity influence on porosity

Mercury injection in the covered sample structure, by two faces and without carrying on pore threshold : 1) structures are well connected between the two injected faces; 2) structures are connected only to one face; 3) structures are not connected to one of the two injected faces.

C) Oriented injection : anisotropy influence on pore thresholds.

La perméabilité, la porosité et les diamètres d'accès sont maximum pour les échantillons situés loin de la faille. L'anisotropie de ces échantillons est également très forte. Le maximum de perméabilité correspond à la direction des chenaux qui constitue cette série fluviale. La structure du réseau initial est essentiellement héritée des conditions de dépôts et de l'arrangement des grains détritiques [Liu *et al.*, 1996]. La conservation de ces caractéristiques physiques montrent que la précipitation d'illite diagénétique modifie peu la structure du matériau [Bjølykke *et al.*, 1996]. Ces échantillons sont caractéristiques non seulement de l'état peu ou pas déformé mais également de l'état avant mise en place de la faille. La forte anisotropie de perméabilité, vue loin de la faille (échantillon M10), est marquée par une forte anisotropie de connectivité du réseau, alors que la zone de gouge est caractérisée par une faible anisotropie de perméabilité (échantillon F1) et de connectivité du réseau. Cette évolution de la perméabilité et de la géométrie du réseau a une origine distincte en fonction du compartiment de la faille. Dans le mur, l'évolution des propriétés physiques sont dus à des processus de dissolution alors que dans le toit ce sont des processus de précipitations qui contrôlent la variation des propriétés physiques. Les caractéristiques des transferts matriciels sont significatifs d'une modification de l'orientation des transferts qui passerait d'un transfert horizontal suivant les structures sédimentaires dans le mur, à

une circulation verticale induite par la formation d'une structure imperméable dans la zone de gouge (fig. 5). L'évolution symétrique des caractéristiques géométriques du réseau autour d'une faille normale déjà décrite dans d'autres contextes [Fowles et Burley, 1994] a deux origines : un processus de compression dans le mur et un processus d'extension dans le toit. Cependant, dans le cas de la faille de Buhl, même si la porosité a un comportement symétrique, la perméabilité n'est pas tout à fait symétrique. La présence de minéraux argileux néoformés dans le réseau poreux dans le toit perturbe les circulations de fluides en rendant le réseau poreux plus hétérogène. Cette structure évolue durant les phases qui séparent deux événements de rupture, et peut jouer le rôle de déflecteur des écoulements de fluides en faisant passer les écoulements d'une direction horizontale, dans les formations sédimentaires, à une direction verticale près des zones de failles.

## CONCLUSION

L'effet du fonctionnement d'une faille normale qui affecte les grès fluviaux du Trias, sur les conditions de drainage, est déterminé grâce à des mesures de perméabilité. La contrainte des caractéristiques géométriques du réseau poreux (volume, diamètre d'accès et connectivité) est, elle, déterminée par porosimétrie par injection de mercure. La tech-



nique de préparation des échantillons nous permet d'injecter le mercure selon une direction bien définie, parallèle aux directions utilisées pour les mesures de perméabilité, d'où la possibilité d'identifier le volume poreux et les diamètres d'accès utile à la mesure de perméabilité, mais aussi la mise en évidence de l'anisotropie de connectivité du réseau poreux. Ainsi la diminution de perméabilité à proximité de la

faille peut être reliée à une diminution de porosité et de diamètre d'accès sans qu'il soit possible de négliger les effets de la connectivité et de la tortuosité.

*Remerciements.* – Nous remercions L'Institut Français du Pétrole pour son support financier dans le cadre du programme « Failles, Fractures et Fluides ». Nous remercions également les « reviewer » pour leurs remarques constructives. Ce papier est une contribution de l'EOST numéro 2002-402.

## Références

- BJØLYKKE K. (1996). – Lithological control on fluid flow in sedimentary basins. In : B. JAMTVEIT and B.W.D. YARDLEY Eds., Fluid flow and transport in rocks. – Chapman and Hall publ., 15-34.
- BODNARD R. J. (1993). – Revised equations and table for determining the freezing depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**, 684-686.
- CAINE J. S., EVANS J.P. & FORSTER C.B. (1996). – Fault zone architecture and permeability structure. – *Geology* **24** (11), 1025-1028.
- DUBOIS M., AYT OUGOUGDAL M., MEERE P., ROYER J.J., BOIRON M.C. & CATHELIN M. (1996). – Temperature of paleo- to modern self sealing within a continental rift basin : the fluid inclusion data. – *Europ. J. Mineral.* **8**, 1065-1080.
- ETCHECOPAR A. & MATTAUER M. (1988). – Méthodes dynamiques d'analyse des populations de failles. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, **8**, **IV**, 2, 289-302.
- ETHERIDGE M.A., WALL V.J. & VERNON R.H. (1983). – The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. – *J. Metam. geol.* **1**, 205-226.
- FOWLES J. & BURLEY S. (1994). – Textural and permeability characteristics of faulted high porosity sandstones. – *Mar. Petrol. geol.*, **11**(5), 608-623.
- GÉRAUD Y. (1991). – Déformation thermomécanique et porosité des roches granitiques. Evolution des espaces poreux. – Thèse de l'Université de Marseille. 329 p.
- GÉRAUD Y. & GAVIGLIO P. (2000). – Reconstitution du réseau poreux d'un échantillon décomprimé. Mise en évidence d'une anisotropie de connectivité. – *C. R. Acad. Sci.*, Paris **331**, 339-344.
- GRAULS D.J. & BALEIX J.M. (1994). – Role of overpressures and in situ stresses in fault controlled hydrocarbon migration : a case study. – *Mar. Petrol. geol.* **11**(6), 734-742.
- HEITZ I. (1996). – Contribution à l'étude du risque sismique dans le Fossé rhénan supérieur. – Mémoire de DEA, ULP Strasbourg, 30 p.
- HIPPLER S.J. (1993). – Deformation microstructures and diagenesis in sandstone adjacent to an extensional fault : implications for the flow and entrapment of hydrocarbons. – *AAPG Bull.*, **77**(4), 625-637.
- KATZ A.J. & THOMPSON A.H. (1987). – Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements. – *J. Geophys. Res.*, **92**(B1), 599-607.
- LARQUÉ P. & WEBER F. (1978) – Dosage quantitatif de minéraux par diffraction de rayons X. – *Note technique*, Lab. Géol. Univ Strasbourg I, 14 p.
- LEE M. & SAVIN S.M. (1985). – Isolation of diagenetic overgrowths on quartz grains for oxygen isotopic analysis. – *Geochim. Cosmochim. Acta* **49**, 497-501.
- LIU K., BOULT P., PAINTER S. & PATERSON L. (1996) – Outcrop analog for sandy braided stream reservoirs : permeability patterns in the Triassic Hawkesbury sandstone, Sydney basin, Australia. – *AAPG Bull.*, **12**, 1850-1866.
- MERTZ (1991). – Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès. – *Sci. géol. Mém.* **90**, 149 p.
- MONICARD R. (1975). – Cours de production. Tome 1 : Caractérisation des roches réservoirs, analyse des carottes, 203 p.
- PAUWELS H., FOUILLAC C. & FOUILLAC C.M. (1993). – Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben : origin of compounds and water-rock interactions. – *Geochim. Cosmochim. Acta* **57**, 2737-2749.
- PELLERIN J.F. (1980). – La porosité mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. – *Bull. Lias. Labo. P. et C.* **106**, 106-116.
- POTY B., LEROY J. & JACHIMOWIZ L. (1976). – Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope : l'installation de microthermométrie Chaixmecca. – *Bull. Soc. fr. Mineral. Cristallogr.* **99**, 182-186.
- RENARD F. (1994). – La déformation mécano-chimique dans la croûte supérieure terrestre. – Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble, Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique. 205 p.
- RENARD F., GRATIER J.-P. & JAMVEIT B. (2000). – Kinetics of crack-sealing, intergranular pressure solution and compaction around active faults. – *J. Struct. Geol.* **22**, 1395-1407.
- SCHOEN L. (1998). – Etude par pétrophysique, géochimie et géochimie isotopique du fonctionnement d'un système de faille dans les grès. – Strasbourg, DEA de L'Université Louis Pasteur, 30 p.
- SIZUN J.P. (1995). – Modifications des structures de porosité de grès lors des transformations pétrographiques dans la diagenèse et l'hydrothermalisme : application au Trias de la marge ardéchoise et du fossé rhénan. – Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 256 p.
- SURMA F. (1999). – Etude des mécanisme de colmatage d'un grès affecté par une faille normale : utilisation des techniques de pétrophysique, minéralogie, étude des inclusions fluides et géochimie. – Strasbourg, DEA de l'Université Louis Pasteur, 30 p.
- TOURNIER B. (2001). – Transferts par capillarité et évaporation dans des roches – rôle des structures de porosité. – Thèse de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 203 p.
- VILLEMIN T. & BERGERAT F. (1987). – L'évolution structurale du fossé rhénan au cours du Cénozoïque : un bilan de la déformation et des effets thermiques de l'extension. – *Bull. Soc. géol Fr.*, **8**(III), 245-255.

